

平成21年 4月21日現在

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18686045

研究課題名(和文) 超高強度コンクリートを用いた実大RC部材性能の検証

研究課題名(英文) Performance of full-scale reinforced concrete members using ultra high strength concrete

研究代表者

丸山 一平 (IPPEI MARUYAMA)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：40363030

研究成果の概要：

近年実用化されつつある超高強度コンクリートの発熱、自己収縮に着目し、実大の鉄筋コンクリート柱の性能について評価した。結果として、自己収縮により鉄筋周囲にひび割れが生じ、付着剛性が低下すること、部材断面内にひび割れが入ることが明らかになった。これらは膨張材と収縮低減剤の併用により抑制可能であった。また、柱の曲げ性能において、自己収縮による早期の鉄筋の圧縮降伏は影響が無いことが解析によりわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2007年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	20,600,000	6,180,000	26,780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：コンクリート構造

## 1. 研究開始当初の背景

研究開発当初、高性能 AE 減水剤の開発とその性能向上や、シリカフェームなどの反応性微粉末を混和する DSP 技術の発展にともなって高強度コンクリートの実用化が進み、実強度 150N/mm<sup>2</sup> 級のコンクリートも実用化されていた。一方で、1990年代から、高強度コンクリートの自己収縮は、コンクリートの硬化過程に生じる収縮であり、特に引張強度が低い時期の現象であることと、セメントの反応自体による水分消費が原因と考えられるため、材料的には不可避な現象であることから、

自己収縮が高強度コンクリートを用いた構造部材においてどのような影響を及ぼすかについては、長らく議論になっていた。

研究開始当初までに、梁の曲げ挙動、とくにひび割れ発生荷重、荷重-たわみ関係、ひび割れ幅、について自己収縮の観点から体系化が行われていたが、RC柱部材の観点から自己収縮の影響について評価した研究はほとんど存在しなかった。

加えて、本研究の前段となる研究において、超高強度コンクリートで作製した無筋のブロックや、鉄筋拘束試験体においてひび割れ

が生じる事例について報告が行われていたため、体系的な実験、ひび割れ発生メカニズムについて、工学的にも評価する必要性が高まっていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、まず、超高強度コンクリートが最も利用される部材である柱部材を中心として、その中に生じる、初期応力・初期欠陥の発生メカニズムを明らかにするとともに、それらが構造挙動にどのような影響を生じさせるかについて考察することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 柱模擬部材実験

柱部材中にどのように、応力、ひび割れが入っているかについて実験的に明らかにする目的で、 $90 \times 90 \times 110 \text{cm}^3$ の実大柱部材を作製し、内部のコンクリートおよび鉄筋ひずみを計測した。鉄筋ひずみ結果を用いれば断面内部の力の釣合からコンクリート応力を算出することができる。また、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみのデータを用いて、クリープ解析を行うことにより、コンクリート応力を実験と解析の両面から検討することができる。模擬部材は、温度依存性を評価する目的で、冬期・夏期の実験を行い、その違いについても検討を行った。柱模擬部材はひずみ、温度の測定だけでなく、材齢28日において、ワイヤソーを用いて試験体を切断し、目視によるひび割れ評価についても行った。また、ひび割れ発生原因が自己収縮であることから、膨張材と収縮低減剤を混和した超高強度コンクリートを用いて冬期実験を実施し、ひび割れが防止できるかどうかについても検討を行った。

### 3. 2 ファイバーモデルによる柱の曲げ挙動評価

超高強度コンクリートの自己収縮が曲げ挙動に及ぼす影響を見るために、鉄筋とコンクリートの応力ゼロ時点のひずみが異なった場合について適用可能なファイバーモデルを開発し、正負交番載荷条件における軸力がある状態の曲げ挙動の検討を行った。

### 3. 3 超高強度コンクリートの自己収縮温度依存性

水和発熱による高温度履歴中に生じる自己収縮挙動を把握するためには、温度ひずみと自己収縮ひずみの成分分離が重要である。この観点から、薄型試験体に実柱部材の温度履歴を与えると同時に、経時的に温度パルスを与えその変形量を計測する試験装置を開発した。この試験装置は、温度制御循環槽、レーザー変位計2対、中空銅型枠より構成され

る。この試験装置を用いて、練上り温度10、20、30℃、最高温度(練上り温度に対して)+0、20、40℃の実験を、セメントペーストおよびコンクリートと同等の骨材を混和させたモルタルについて行った。

### 3. 4 熱力学観点からみた超高強度コンクリートの自己収縮性状

自己収縮のメカニズムの観点から、セメント硬化体のヤング率、平衡相対湿度、自己収縮、線膨張率、結合水、自由水量、比表面積について実験的に取得した。

## 4. 研究成果

### 4. 1 柱試験体の実験結果

柱試験体では、以下のようなひび割れが確認された。

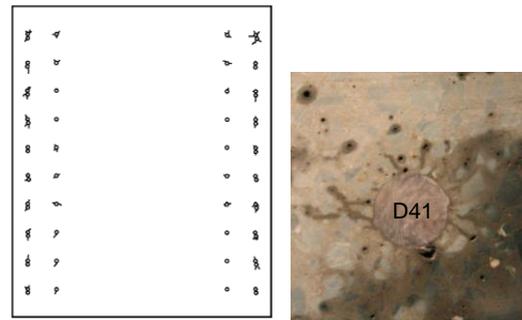


図1 せん断補強筋周囲、主筋周囲、かぶりのひび割れ

これらの実験は、冬期と夏期について実施された。実験の結果、冬期の試験体において、ひび割れが多数確認された。

加えて、自己収縮の温度依存性に起因して、柱内部には、縦ひび割れが生じる方向に応力が生ずることを実験・解析の両面から明らかにした。

すなわち、柱中心部コンクリートの縦ひずみおよび横ひずみの実験結果を比較したところ、横ひずみの方が収縮が小さい傾向を示した。これは、自己収縮の等方性を仮定すると、引張応力が生じていることを意味しており、これについて解析的に検討した結果、内部には柱水平方向にも引張応力が生じていることが明らかになった。

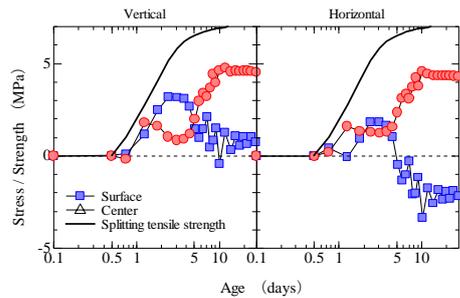


図2 柱内部の垂直・水平方向の応力の解析結果

また、これらのひび割れを抑制する目的で膨張材および収縮低減剤を混和したコンクリートによって柱を作製し、同様な実験を行った結果、ひび割れを抑制することが可能であることも実験的に確認した。

#### 4. 2ファイバーモデルによる検討

コンクリートの初期応力を Step by Step 法により予測し、そのまま Fiber モデルとして解析が可能なプログラムを開発した。このプログラムにより、軸力比、鉄筋降伏強度、鉄筋比などをパラメータとした計算を行い、柱部材の曲げ挙動について分析した結果、1) 自己収縮は最大曲げ耐力の評価に大きな影響を持たず、2) 短期荷重レベルの正負交番荷重では、圧縮側及び引張側の鉄筋が圧縮降伏した後は、鉄筋、およびコンクリートの材軸方向での応力負担に関して、自己収縮の影響は無視しうるほど小さくなる。また、その後長期の状態に戻った後は、鉄筋応力がゼロになるひずみとコンクリート応力がゼロになるひずみ点が近づくため、RC柱の応力状態は自己収縮を考慮していない状態に近づく。といった知見が得られた。

#### 4. 3自己収縮温度依存性

冬期の柱模擬部材においてひび割れが多く発生する傾向が確認されたため、超高強度コンクリートの自己収縮の温度依存性について検討した。その結果が図3である。実験により、練上り温度が低いほど材齢 24 時間までに生じる急激な速度で進行する自己収縮量が大きくなり、また、水和熱による温度上昇が大きいほど、その後の自己収縮が大きく進行する性状が得られた。このことは、冬場の打込みで柱部材のように水和による高温履歴を生じた場合、1 年を通じてもっとも自己収縮が大きくなることを示しており、柱模擬部材の実験結果と対応するものであった。

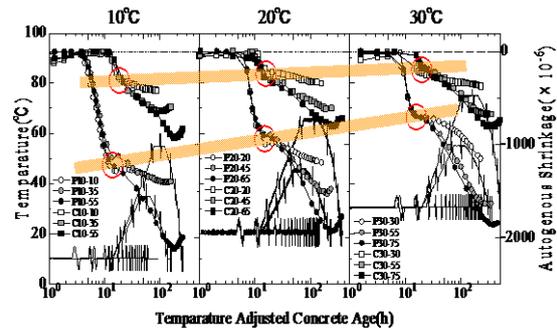


図3 自己収縮の温度依存性

また、これらの実験結果から、材齢 24 時間までに見られる急激な速度で進行する自己収縮と、その後の緩やかに進行する自己収縮において、異なる活性化エネルギーを有することを実験的に明らかにした。また、この事実に基づき、超高強度の自己収縮予測式を提案した。

4. 4セメント硬化体の性状について  
高温履歴を経る超低水セメント比領域のセメント硬化体の性状について実験的検討を行ったところ、以下のような新しい知見を得た。1) 高温履歴を経たセメント硬化体は、一定材齢において、結合水が増大しなくなり、その量は最終的に 20 度一定条件と同等である。2) 結合水量は変化しないものの高温履歴を経たものの方が比表面積は大幅に大きい。これは、シリカフェームの反応によって、低 Ca/Si 比の C-S-H ができるものによると推察された。3) また、自己乾燥プロセスにおいて、内部の平衡状態は、ヒステリシス上に存在し、吸着等温線上に平衡点が存在しないことが明らかになった。これらの実験的事実は、超高強度コンクリートの自己収縮を水和反応から予測する上で重要な知見であると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 12 件)

- 1) 丸山一平、鈴木雅博、勅使川原正臣、佐藤良一：鉄筋コンクリート柱の断面内応力に関する解析的検討 ―超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その 2―、日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 637, pp. 425-432, 2009.3 (査読有り)
- 2) 寺本篤史、丸山一平：低水結合材比セメントペーストの自己収縮温度依存性に関する研究、セメント・コンクリート論文

- 集, No. 62, pp. 411-418, 2009.3 (査読有り)
- 3) 鈴木雅博, 丸山一平, 中瀬博一, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の膨張材と収縮低減剤による初期応力・初期欠陥低減に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No. 635, pp.1-10, 2009.1 (査読有り)
  - 4) 寺本篤史, 丸山一平: 超低水セメント比シリカフェームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No. 634, pp. 2069-2076, 2008.12 (査読有り)
  - 5) 丸山一平, 勅使川原正臣: 超高強度コンクリートの自己収縮が RC 柱の曲げ性能に及ぼす影響に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 630, pp. 1331-1338, 2008.8 (査読有り)
  - 6) 丸山一平, 鈴木雅博, 中瀬博一, 佐藤良一: 温度履歴が RC 柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討—超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その1—, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 629, pp. 1035-1042, 2008.7 (査読有り)
  - 7) 丸山一平, 寺本篤史, 低水セメント比時のシリカフェームを混和したセメント硬化体の収縮挙動に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 579-584, 2008 (査読有り)
  - 8) 丸山一平, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見, 日本建築学会構造系論文集, No. 72, Vol. 617, pp. 1-7, 2007.7 (査読有り)
  - 9) 寺本篤史, 山崎康太, 丸山一平, 鈴木雅博, 超高強度コンクリートの自己収縮温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp.489-494, 2008 (査読有り)
  - 10) 寺本篤史, 宮治友也, 丸山一平, 鈴木雅博, 超高強度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 633-638, 2007.7 (査読有り)
  - 11) 桐山宏和, 丸山一平, 鈴木雅博, 佐藤良一, 超高強度 RC 部材中の初期応力発生メカニズムに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 669-674, 2007.7 (査読有り)
  - 12) 丸山一平, 亀田昭一, 鈴木雅博, 佐藤良一, RC プリズムにおける自己収縮による微細ひび割れ発生と収縮応力挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.587-592, 2006.7 (査読有り)
- [学会発表] (計 16 件)
- 1) 寺本篤史, 丸山一平, 超高強度セメントペーストの初期養生温度が自己収縮に及ぼす影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, 岐阜, No.47, pp. 1-4, 2009.2.14
  - 2) A. Teramoto, I. Maruyama, Temperature dependent behavior of autogenous shrinkage of cement paste containing silicafume and with low w/b ratio, Proc. of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, pp. 141-147, 2008.10.27
  - 3) I. Maruyama, M. Teshigawara, Effect of autogenous shrinkage of ultra high-strength concrete on bending behavior of reinforced concrete column, Proc. of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, pp. 939-944, 2008.10.27
  - 4) I. Maruyama, M. Suzuki, R. Sato, Self-induced stress in reinforced ultra-high strength concrete, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, ed. T. Tanabe et al., CRC Press, Leiden, Ise-shima, Japan, Vol. 1, pp. 365-372, 2008.9.30
  - 5) A. Teramoto, I. Maruyama, M. Suzuki, Temperature dependency of autogenous shrinkage of ultra high-strength concrete, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, ed. T. Tanabe et al., CRC Press, Ise-shima, Japan, Leiden, pp. 701-708, 2008.9.30
  - 6) 中瀬博一, 鈴木雅博, 丸山一平, 初期高温養生を行った超高強度 PCa コンクリート部材の収縮性状に関する実験的研究 (その1) 実験概要および強度性状, 日本建築学会学術講演梗概集, 広島, A-1, pp.829-830, 2008.9.18
  - 7) 山崎康太, 寺本篤史, 丸山一平, コンクリートおよびセメント硬化体の平衡相対湿度の測定に関する基礎検討, 日本建築

- 学会学術講演梗概集，広島，A-1，pp.755-756, 2008.9.18
- 8) 寺本篤史，山崎康太，丸山一平，超高強度セメントペーストの自己収縮進行速度に及ぼす養生温度の影響，セメント技術大会講演要旨，東京，Vol.62，pp. 60-61，2008.5.28
- 9) 寺本篤史，山崎康太，黒川善幸，丸山一平，超高強度コンクリートの自己収縮温度依存性に関する実験的検討，日本建築学会東海支部研究報告集，名古屋，Vol.46，pp.73-76，2008.2.16
- 10) 丸山一平，鈴木雅博，佐藤良一，超高強度コンクリートを用いた RC 柱部材の初期応力に関する検討，日本コンクリート工学，耐久性力学に関するシンポジウム論文集，東京，pp. 303-312，2007.12.21
- 11) 丸山一平，寺本篤史，超高強度セメントペーストの自己収縮挙動，第 34 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，岡山，pp. 38-90，2007.11.23
- 12) 寺本篤史，丸山一平，宮治友也，超高強度コンクリートの若材齢における線膨張係数の経時変化，日本建築学会学術講演梗概集，福岡，A-1，pp.305-306，2007.8.29
- 13) 宮治友也，丸山一平，寺本篤史，初期高温履歴を受けた超高強度セメントペーストの基礎物性に関する検討，日本建築学会学術講演梗概集，福岡，A-1，pp.71-72，2007.8.29
- 14) 丸山一平，寺本篤史，宮治友也，若材齢における超高強度コンクリートの基礎物性に関する検討，第 61 回セメント技術大会講演要旨，東京，Vol. 61，pp. 230-231，2007.5.30
- 15) 丸山一平，鈴木雅博，佐藤良一：超高強度コンクリートを用いた RC 柱部材性能における自己収縮の影響に関する基礎的検討，混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集，東京，pp. II-71-II-78，2007.3.20
- 16) 鈴木雅博，丸山一平，尼丁将太，佐藤良一，超高強度膨脹コンクリートの自己応力に関する検討，セメント技術大会講演要旨，東京，Vol. 60，pp.186-187，2006.5.24
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
丸山 一平 (IPPEI MARUYAMA)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授  
研究者番号：40363030